

夏玉米交替灌溉施肥的水氮耦合效应研究

薛亮¹, 周春菊², 雷杨莉¹, 邱临静¹, 李志军³, 王林权^{1*}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学生命科学学院, 杨凌 712100;
3. 西北农林科技大学水利建筑与工程学院, 杨凌 712100)

摘要: 以夏玉米为研究对象进行大田试验, 采用二因素四水平完全方案, 随机排列, 3次重复, 根据玉米产量建立回归模型并对其进行解析, 确定隔沟交替灌溉施肥条件下的最佳水肥配比。研究表明: 在供试条件下水、氮对产量有明显的促进作用, 而且氮素作用大于灌水作用; 两因素交互作用对玉米产量的影响为正效应。供试条件下的最高产量以及相应水、氮最佳配比为: 最高产量 4076 kg/hm², 生育期灌水量为 972 m³/hm², 施氮量为 230 kg/hm²。与常规灌溉相比, 节水施肥模式中的水肥耦合效应对于减少水资源浪费, 提高肥料利用率具有重要的理论与实践意义。

关键词: 夏玉米; 交替灌溉; 水氮耦合

中图分类号: S275.3

文献标识码: B

文章编号: 1002-6819(2008)-3-0091-04

薛亮, 周春菊, 雷杨莉, 等. 夏玉米交替灌溉施肥的水氮耦合效应研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 91-94.

Xue Liang, Zhou Chunju, Lei Yangli, et al. Effect of water and nitrogen coupling under alternate furrow irrigation and fertilizer placement on summer maize[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(3): 91-94. (in Chinese with English abstract)

0 引言

由于水资源总量不足, 时空分布不均, 水资源匮乏已经成为制约中国农业生产的主要因素之一, 大力发展节水农业, 提高农业水资源利用效率势在必行。控制性作物根系分区交替灌溉是康绍忠等人于 1997 年结合根系感知干旱的根源信号调控气孔开度的调控理论与节水灌溉技术提出的一种适用于干旱区农业的灌溉模式^[1]。由于全球性的水资源缺乏问题日益突出, 从 20 世纪 70 年代开始, 交替灌溉技术在干旱半干旱地区的试验研究和应用越来越多, 其中对玉米、小麦、棉花、烤烟等作物的交替灌溉试验研究已较为系统和深入, 结果显示: 交替灌溉方式能够降低土壤机械强度, 改善土壤通透性, 刺激根系吸水的补偿效应, 增加根系吸收养分能力, 提高矿质养分的有效性, 减少作物蒸腾量而使光合作用维持在较高水平, 可以使灌溉水分利用效率和植物水分利用效率明显提高^[2-6]。国内外学者的相关研究表明^[7-10]: 分根交替灌溉条件下作物根系分布面积和根量大幅增加; 交替沟灌并将肥料施于干沟内, 能有效地减少硝态氮的淋失; 当降雨量高于年平均降雨量时, 无灌溉沟中和灌溉沟中根的生长量没有差异。邢维芹等人研究发现水肥分区隔沟灌溉处理有利于作物对养分的吸收, 并且土壤水分在剖面上以垂直运动为主^[10]。李志军等对分根区交替灌溉下冬小麦水分与养分利用的影响进行了研究, 结果表明在同一土壤含水率下, 控制 1/2 区域交替灌溉对养分离子的吸收优于常规均匀灌水和固定 1/2 区域灌水^[11]。谭军利等研究发现交替灌溉为水分在土壤表层以下的侧向运动提供了很大空间, 这可以大大减少灌区水分向下运动, 减缓肥料的淋溶, 但灌水量过大, 根系

两侧没有水势梯度差异, 可能造成肥料的淋溶, 污染地下水^[12]。

针对中国半干旱区水资源日益紧张的现状, 建立非充分灌溉制度必须要走精确的按需灌溉之路^[13]。研究交替隔沟灌溉条件下的水肥交互作用, 找出其合理配比及肥料的优化组合, 建立水肥适量耦合模型, 对充分发挥资源潜力、减少浪费具有实际意义^[14]。本试验在水肥空间耦合研究的基础上^[15,16], 通过大田试验, 依托交替灌溉施肥技术, 对夏玉米在交替灌溉下的水肥数量耦合进行研究, 以探索适用于本地区的优化节水施肥模式, 从而为旱区农业水肥管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地基本情况

试验于 2006 年 6~10 月在陕西杨凌的西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室, 农业部旱区农业节水重点开放实验室的灌溉试验站进行。供试土壤是旱耕土垫人为土, 其基本性状为: 有机质 12.19 g/kg, 全氮 0.67 g/kg, 碱解氮 41.32 g/kg, 速效磷 7.61 mg/kg, 速效钾 109.72 mg/kg, pH 值 7.80。

1.2 供试材料

供试夏玉米品种为陕单 9 号, 供试氮肥为尿素, 含 N 46%。

1.3 试验设计

本研究采用大田试验, 灌水量设 0 (不灌水)、450、900、1350 m³/hm² 4 个水平, 施氮量设 0 (不施肥)、150、225、300 kg/hm² 4 个水平, 共 16 个处理。小区面积 20m² (4 m×5 m), 种植密度为 39000 株/hm²。随机区组排列, 重复 3 次。2006 年 6 月 10 日播种, 7 月 7 日间苗, 每穴留苗 1 株, 10 月 1 日收获。

灌溉采用水肥分区隔沟交替灌溉, 在喇叭口期和开花期各灌溉一次, 每次灌水量为总水量的一半。水肥分区交替灌溉指隔沟交替灌水, 每次灌水与施肥在不同的沟中进行; 喇叭口期 (第一次灌溉施肥) 的灌水区在开花期 (第二次灌溉施肥) 变成施肥区, 而相应的施肥区则变成灌水区。施肥采取分次施肥方式, 1/2 作基肥施入, 剩余 1/2 分两次在喇叭口期和开花期追肥。追肥采用穴施法, 离根 10 cm 处挖一深 5 cm 的小穴, 施肥后用土覆盖。

收稿日期: 2007-04-18 修订日期: 2007-12-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助 (30571085)

作者简介: 薛亮 (1982-), 男, 甘肃永登人, 主要从事植物营养与调控研究。杨凌 西北农林科技大学资源与环境学院, 712100。

Email: xuel_521@yahoo.com.cn.

*通讯作者: 王林权, 教授, 博士生导师。杨凌 西北农林科技大学资源与环境学院, 712100。 Email: linquanw@yahoo.com.cn

2 结果与分析

2.1 产量回归方程的建立

以籽粒产量为目标函数, 灌水量和施氮量为自变量, 求得籽粒产量与各因素回归方程为:

$$Y=2910.56+1531.58x_1+1601.64x_2-1169.79x_1^2-1138.65x_2^2+199.79x_1x_2 \quad (R=0.8849) \quad (1)$$

式中 Y ——玉米产量, kg/hm^2 ; x_1 、 x_2 ——分别为实验设计的灌水量、施肥量的编码值。经检验该回归模型模拟项的 $F=7.2148$, 大于 0.01 水平下的 F 值 (6.70), 说明方程是极显著的, 模型与实际情况拟合很好, 能够反映产量与灌水量和施肥量之间的关系。回归系数显著性检验结果表明, x_1 、 x_2 项以及 x_1^2 、 x_2^2 、 x_1x_2 项均达到显著水平, 这表明水、氮以及水氮交互作用对产量具有显著影响。

模型中 x_1 、 x_2 的二次项系数为负数, 因此, 在设计范围内产量随着灌水量和施肥量的增加而呈现开口向下的抛物线形变化, 说明灌水量和施肥量都存在一个最大值, 过量投入就会引起产量下降, 造成水分和肥料的无谓浪费。

2.2 数学模型的解析

1) 主因子效应

经过标准化使量纲统一后, 偏回归系数可以直接反映相应因素对因变量的影响力, 正负号表示因素对产量的相关方向, 其值大小体现对产量的贡献。在本试验中水分和氮素量纲不同, 不能直接比较。经过无量纲线性编码代换, 回归系数已经标准化, 可以根据其大小正负判断试验因素对籽粒产量的影响。回归模型的偏回归系数表明, 在试验设计的范围内, 水肥均对产量有明显的促进作用, 而且可以判断在本试验中氮素作用大于水分作用。

2) 单因素效应分析

为了进一步探讨各个因素的单个效应, 可对式 (1) 进行降维处理, 即将二因素中的任意一个固定为零水平, 则可得到其中一个因素对产量的一元二次子模型

灌水量:

$$Y_1=2910.56+1531.58x_1-1169.79x_1^2 \quad (2)$$

施氮量:

$$Y_2=2910.56+1601.64x_2-1138.65x_2^2 \quad (3)$$

在试验设计的各因素水平范围内, 各因子的产量效应如图 1 所示, 从图中可以看出, 水、氮两因素的产量效应均为抛物线, 表明各因素都有明显的增产效应。各抛物线的顶点就是单因素对应的最高产量值, 与其对应的便是各因素的最适投入量。当投入量低于最适投入量时, 随着投入量的增加, 产量随之增加; 到达最适投入量时产量最大; 继续加大投入量, 产量随之

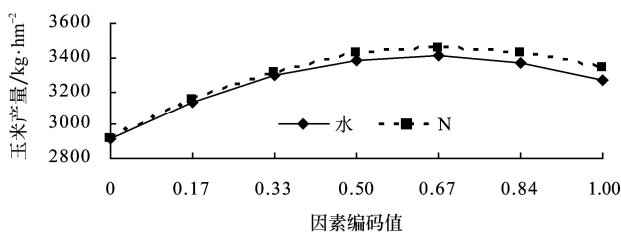


图 1 灌水量与施氮量对玉米产量的影响

Fig. 1 Effects of water irrigation and N fertilizer on maize yield

减小, 符合报酬递减定律。在本试验中, 最适灌水量为 0.72 (码值), 换算为实际用量为 $486 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 最适氮素投入量为 0.77 (码值), 即为 $230 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。

3) 单因素边际效应

边际效益分析是对单位投入增量的收益进行分析。多元回归模型中边际产量是指在其他因子恒定的条件下, 增加单位量某一因子时, 总产量的增加量。边际产量可以反映各因子的最适投入量和单位投入量变化对产量增(减)速率的影响, 它是对总产量变动速率的反映。在多元回归模型中, 某一因子的边际产量必然要受其他因子用量的影响。各因子在不同水平下的边际产量可通过对回归方程(式 1)求一阶偏导数进行, 得到式 (4)、

(5)。若各因子效应均符合报酬递减规律, 则当各因子的边际产量为零, 即达到最高产量点时, 此时各因子的施用量即为最高产量施用量。

$$\frac{dy}{dx_1} = 1531.58 - 2339.58x_1 \quad (4)$$

$$\frac{dy}{dx_2} = 1601.64 - 2277.3x_2 \quad (5)$$

图 2 反映了各因素的边际产量效应随着投入量增加的变化情况, 水、氮两因素边际效益均呈递减趋势。灌水和施氮的边际效益递减率趋势相似, 当水、氮投入量较低时, 边际效应较大; 随着投入量的增加, 边际效益递减。与 x 轴相交之处为最适投入量, 此时的边际产量为零, 但总产量最高; 继续增加投入量, 边际效应将出现负值, 总产量下降。因此, 水、氮投入量少时, 虽然边际效益高, 但总产量低, 总收益少。

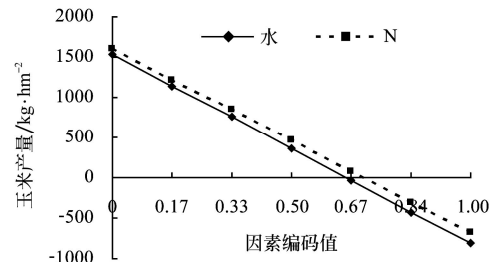


图 2 灌水量与施氮量的单因素边际效应

Fig. 2 Marginal effects of water irrigation and N fertilizer

4) 两因素耦合效应分析

由产量效应回归方程可知, 水氮交互项 x_1x_2 的系数为正值, 这说明水氮之间的交互为正效应, 两者在一定范围内相互配施可以促进夏玉米产量。

根据式 (1) 做出二因子的交互效应图 (图 3)。曲面图上各点的高度表示相对应的水肥因子在一定水平组合时的玉米籽粒产量, 曲面上点的高度越高, 表示籽粒产量越大; 曲线表示固定水、氮两因素中某一个因子时, 籽粒产量随着另一个因子投入量的增减而变化的趋势。

由图 3 可以看出水和氮对玉米产量效应都呈抛物线性, 与前面的分析相吻合。随着二者投入量的增加, 产量增加明显, 曲面坡度变化较快, 呈正凸面状, 说明二者在设计水平范围内, 增产效应接近。产量最低点出现在灌水量和施氮量都取较低水平的情况下, 最高产量出现在灌水和施氮均比较高的水平上。在灌水量和施氮量都增加时, 籽粒产量先大幅提高, 到出现一个最高点后又小幅降低。当灌水水平一致时, 籽粒产量随着施氮

量的增加呈现先增后降的趋势；施氮量一致时，产量随灌水量的增加也是先增加后降低。施氮量处于低水平时，增加灌水量，籽粒产量增加并不明显；而施氮量处于较高水平时，籽粒产量随灌水水平的提高增产幅度增大；同时，对水分也有这种现象存在。水氮因子在最高水平时产量并非最高，这说明两因素的配施非常重要，在水分条件较好的情况下，供应适宜的氮素才可以维持较高的光合效率，得到最大的产量效益^[17]。

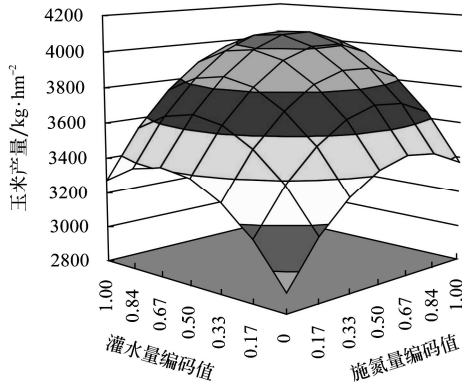


图3 灌水量和氮肥用量对玉米产量的影响
Fig.3 Effects of water irrigation and N fertilizer on maize yield

2.3 模型寻优

根据式 (1)，在 $0 \leq x_i \leq 1$ 之间各取 7 个水平，利用试验两因素的编码值组合可得到产量超过平均值 3693 kg/hm^2 的组合方案 27 套，占全部方案的 55.1%。对其灌水量和施氮量各水平的频数进行统计，得到产量 $\geq 3693 \text{ kg/hm}^2$ 的管理方案 (表 1)：每次灌水量为 $354.38 \sim 497.61 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ，总施氮量为 $174.42 \sim 233.25 \text{ kg/hm}^2$ 。最高产量为 4075.81 kg/hm^2 ，对应每次灌水量为 $486.06 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ，施氮量为 230.05 kg/hm^2 。

表 1 籽粒产量大于平均值 3693 kg/hm^2 的各因子取值频率分布及配比方案配合

Table 1 Factor value of the frequency distribution and proportion plan with grain yield surpass average 3693 kg/hm^2

水平编码	x_1		x_2	
	次数	频数	次数	频数
0	0	0	0	0
0.17	0	0	2	7.5
0.33	5	18.5	5	18.5
0.5	5	18.5	5	18.5
0.67	6	22.25	5	18.5
0.84	6	22.25	5	18.5
1	5	18.5	5	18.5
总次数	27		27	
编码加权均数	0.5648		0.6304	
标准误	0.0516		0.0453	
95%置信区间	0.5250~0.7372		0.5814~0.7675	
最优配比方案	$354.38 \sim 497.61 \text{ (m}^3/\text{hm}^2)$		$174.42 \sim 233.25 \text{ (kg/hm}^2)$	

3 结论与讨论

3.1 结论

田间小区试验表明，在陕西关中地区小麦-玉米轮作条件下夏玉米田补充灌溉和施用氮肥均有增产效应，氮素作用大于水分作用；水、氮交互作用为正效应。在供试条件下，控制性交替灌溉施肥的最佳水氮配比范围为：生育期总灌水量 $708.76 \sim 995.22 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ，总施氮量 $174.42 \sim 233.25 \text{ kg/hm}^2$ ，最高产量以及相应水氮最佳配比为：最高产量 4076 kg/hm^2 ，总灌水量为 $972 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ，总施氮量为 230 kg/hm^2 。在水肥异区交替灌溉施肥条件下，虽然产量略低于常规施肥灌水 (4698 kg/hm^2)，但最高产量的水氮投入量远低于当地生产中的常规灌水量 ($1800 \text{ m}^3/\text{hm}^2$) 和施肥水平 (300 kg/hm^2)，说明分根交替灌溉施肥技术在当地玉米生产中节水节肥效应显著。

3.2 讨论

在农业生产中，必须强调“以水定产，以肥调水”理论的重要性^[18]，水分和养分既是影响旱地农业生产的主要胁迫因子，也是一对因互补、互相作用的因子。科学合理地确定灌水量和施肥量，充分利用它们之间的耦合效应，才能发挥两者最大的增产效果。在干旱半干旱地区，水分和养分俱缺，作物产量受两者共同影响。水分的供应必须有与之相当的氮肥配合，否则，就会降低作物对水分的利用效率。同样，氮素的有效利用也需要适宜的水分供应。灌水模式和灌水量的变化势必引起土壤中水、氮运移和作物对养分吸收利用的变化，因此施肥方式和施肥量也应随着调整。水肥异区交替灌溉施肥的效果与灌水量密切相关，在低灌水量 ($450 \text{ m}^3/\text{hm}^2$) 的条件下，施肥区和灌水区之间存在水势梯度差异， $\text{NO}_3^- \text{—N}$ 含量也有差异；灌溉效率和肥料利用率均高于均匀灌溉。在高灌水量 ($900 \text{ m}^3/\text{hm}^2$) 水平下，水肥异区交替灌水与常规均匀灌水差异不显著，养分离子发生强烈淋洗^[15]。因此有必要研究交替施肥灌水条件下的水、氮耦合效应，以最大程度地提高这种新型节水技术的效益。虽然玉米水肥耦合效应的研究很多^[19-21]，但是关于隔沟交替灌溉条件下的水肥数量耦合效应未见报道。本研究表明，施氮量低时，增加灌水量，不增加产量；施氮量高时，籽粒产量随灌水量增加而大幅度增加；反之亦然，但并不是灌水量和施肥量越多越好。说明在节水灌溉条件下，也存在水、氮的最佳耦合问题。

从试验的单因素分析结果看，本试验中施氮作用大于灌水作用，这可能是由于玉米生长后期降水量较为充沛，掩盖了灌溉水的部分效应。说明大田试验结果受当年降雨等气候因素影响，应该连续多年试验，才能取得比较有代表性结果。另外，由于试验方法和设计的不同，建立模型时，试验中水氮因子的设计水平及间距都不完全一样，因此，比较水氮效应的大小具有相对性^[22]。本试验的产量比一般报道偏低，除了交替灌溉施肥的灌水量小及上述因素外，可能还与播种密度小有关，一般高产玉米的播种密度可达 60000 株/hm^2 以上^[23]，而本次试验的密度为 39000 株/hm^2 。因此在以后的研究中应加强水、氮用量与种植密度的关系研究。

致谢：本研究是在西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室，农业部旱区农业节水重点开放实验室的试验田完成，在试验过程中张富仓教授提供了建设性意见和无私的帮助，特此表示衷心的感谢。

[参 考 文 献]

- [1] 康绍忠, 张建华, 梁宗锁, 等. 控制性交替灌溉——一种新的农田节水调控思路[J]. 干旱地区农业研究, 1997, 15 (1): 1—6.
- [2] 潘英华, 康绍忠. 交替隔沟灌溉水分入渗规律及其对作物水分利用的影响[J]. 农业工程学报, 2000, 16 (1): 39—43.
- [3] 汪耀富, 蔡寒玉, 张晓海, 等. 分根交替灌溉对烤烟生理特性和烟叶产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24 (5): 93—98.
- [4] 邢维芹, 王林权, 李生秀. 半干旱区夏玉米的水肥空间耦合效应[J]. 农业现代化研究, 2001, 22(3): 150—153.
- [5] 杜太生, 康绍忠, 胡笑涛, 等. 根系分区交替灌溉对棉花产量和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38 (10): 2061—2068.
- [6] 梁宗锁, 康绍忠, 石培泽, 等. 隔沟交替灌溉对玉米根系分布和产量的影响及其节水效益[J]. 中国农业科学, 2000, 33(6): 26—32.
- [7] Benjamin J G, Porter L K, Duke H R, et al. Nitrogen movement with furrow irrigation method and fertilizer band placement [J]. Soil Sci Soc Am. J, 1998, 62(4): 1103—1108.
- [8] Skinner R H, Hanson J D, Benjamin J G. Root distribution following spatial of water and nitrogen supply in furrow irrigated corn [J]. Plant and Soil, 1998, 199: 187—194.
- [9] Skinner R H, Hanson J D, Benjamin J G. Nitrogen uptake and partitioning under alternate-and every-furrow irrigation[J]. Plant Soil, 1999, 210: 11—20.
- [10] 邢维芹, 王林权, 李立平, 等. 半干旱区玉米水肥空间耦合效应 II. 土壤水分和速效氮的动态分布[J]. 土壤, 2003, 35 (3): 242—247.
- [11] 李志军, 张富仓, 康绍忠. 控制性根系分区交替灌溉对冬小麦水分与养分利用的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 17—21.
- [12] 谭军利, 王林权, 李生秀. 不同灌溉模式下水分养分的运移及其利用[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(4): 442—448.
- [13] 山 仑. 植物抗旱生理研究与发展旱地农业[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 1 (1): 1—5.
- [14] 孙景生, 康绍忠, 蔡焕杰, 等. 控制性交替灌溉技术的研究进展[J]. 农业工程学报, 2001, 17 (4): 1—5.
- [15] 邢维芹, 王林权, 骆永明, 等. 半干旱地区玉米的水肥空间耦合效应研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18 (6): 46—49.
- [16] 宋海星, 李生秀. 限根条件下供氮对玉米光合作用有关生理特性的影响[J]. 干旱地区研究, 2004, 22 (4): 28—32.
- [17] 金 轲, 汪德水, 蔡典雄, 等. 旱地农田肥水耦合效应及其模式研究[J]. 中国农业科学, 1999, 32 (5): 104—104.
- [18] 李世清, 李生秀. 水肥配合对玉米产量和肥料效果的影响[J]. 干旱地区研究, 1994, 12 (1): 47—53.
- [19] 孟兆江, 刘安能, 吴海卿. 商丘试验区夏玉米节水高产水肥耦合数学模型与优化方案[J]. 灌溉排水, 1997, 16(4): 18—21.
- [20] 刘作新, 郑昭佩, 王 建. 辽西半干旱区小麦、玉米水肥耦合效应研究[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4): 540—544.
- [21] 张秋英, 刘晓冰, 金 剑, 等. 水肥耦合对玉米光合特性及产量的影响[J]. 玉米科学, 2001, 9(2): 64—67.
- [22] 于亚军, 李 军, 贾志宽, 等. 旱作农田水肥耦合研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23 (3): 220—224.
- [23] 韩 萍, 李海燕, 侯长希, 等. 中国玉米生产 30 年回顾[J]. 农艺科学, 2007, 23 (11): 202—206.

Effect of water and nitrogen spatial coupling under alternate furrow irrigation and fertilizer placement on summer maize

Xue liang¹, Zhou Chunju², Lei Yangli¹, Qiu Linjing¹, Li Zhijun³, Wang Linqun^{1*}

(1. College of Res. and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China;

2. College of Life Science, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China;

3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China)

Abstract: Field experiment included furrow fertilizer placement with alternate furrow irrigation was conducted. The experiment had two factors and four levels design with three replications. The plots were randomly arrayed in field. The regression model of summer maize yield was established and optimal ratio of water and fertilization coupling under alternate and every furrow irrigation and fertilizer placement was determined. The results indicate that both water irrigation and fertilizer have pronounced effects on the maize yield under the experiment conditions, and the effect of N fertilizer application is more significantly than that of water irrigation. There are positive interactions between water, N and maize yield. The optimal ratio of water irrigation and N are 972 m³/hm² and 230 kg/hm², respectively, and the highest yield is 4076 kg/hm². Compared with the traditional irrigation model, water and fertilization coupling effects of water saving and fertilization model have important theoretical and practical significance for reducing water resource waste and increasing fertilization use efficiency.

Key words: summer maize; alternating furrow irrigation; water and nitrogen coupling